

## 열역학 모델을 이용한 콘크리트 열화 평가

정혜룡, 권기정, 류지훈\*, 김도겸\*\*, 김진영\*

한국방사성폐기물관리공단, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*\*한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산구 대화동

nohul@krmc.or.kr

### 1. 서론

현재 국의 운영 혹은 건설 중인 방사성폐기물 처분 시설은 콘크리트를 공학적방벽으로 활용하고 있다. 하지만, 콘크리트는 지하수 혹은 빗물 등과의 반응으로 인해 공극을 증가 등과 같은 열화현상이 발생하게 된다. 이와 같은 콘크리트의 장기 변화현상을 예측하기 위해 국·내외에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이의 일환으로 열역학 모델을 활용한 콘크리트 장기 변화 예측모델개발이 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 열역학 모델을 활용하여 콘크리트의 장기변화특성 모델을 개발하였으며, 본 모델의 결과를 회분식 실험을 통하여 검증하였다.

### 2. 모델링

본 논문에서는 지구화학 모델 프로그램인 PHEEQC를 사용하여 시멘트 수화 및 열화과정과 관련된 과정을 모사하였다.

콘크리트 변화특성을 예측하기 위해서는 시멘트 물질의 수화 및 열화과정에 대한 정확한 이해가 필수적이다. 스위스 EMPA, NAGRA, PIS에서는 GEM-Selektor 코드를 확장하여 시멘트 물질 수화반응을 예측하였으며, 시멘트 수화반응에 대한 열역학 데이터베이스를 개발하였다. 본 연구에서는 스위스 NAGRA/PSI에서 개발한 시멘트 수화반응 열역학 데이터베이스[1]를 채택하여 모델링을 수행하였다.

콘크리트 열화 모델링은 먼저, 시멘트 광물조성을 입력하여 시멘트 수화반응에 대한 모델링을 수행한다. 이 때 시멘트 수화반응에 대한 열역학 데이터베이스가 요구된다. 이를 바탕으로 지하수 혹은 빗물이 콘크리트 내부로 이동하여 수화생성물과의 반응에 따라 콘크리트 내의 광물 용해 및 2차 광물 침전현상을 모사하게 된다. 이로 인해 콘크리트 내부의 광물농도, 공극율, 공극수 pH 변화특성에 대해 예측하게 된다.

### 3. 실험방법

열역학 모델을 통한 콘크리트 변화특성에 대한 검증 위해 시멘트 몰드를 제작하여 장기 용출 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 콘크리트 배합비는 Table 1에 나타내었다. 직경 100mm, 높이 200mm 시멘트 몰드를 제작하여 경주처분장 사일로 갭이에서 샘플링한 지하수로 채워진 반응용기에 넣어 약 1년간의 용출 실험을 수행하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험기간 동안 콘크리트 용출특성을 모니터링하기 위해 pH, 용존산소, 산화-환원전위 센서를 설치하여 실시간 모니터링을 수행하였다. 용출 실험 종료 후, 용액 및 시멘트 시편에 대한 상세분석을 실시하였다.

Table 1. Concrete mix design.

W/(C+P) (%)	S/a (%)	Materials(kg/m <sup>3</sup> )						
		Water	Cement	Fly ash (3/4'')	Agg (3/4'')	Sand	WRA	AEA
40	44.4	162.75	325.50	81.38	938.77	748.89	1.63	0.18

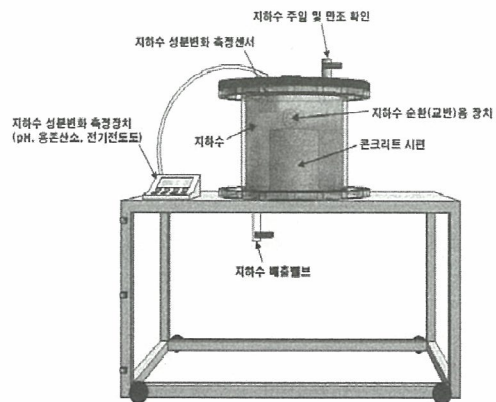


Fig. 1. Experimental set-up.

#### 4. 결과

침출실험 결과와 모델링 결과를 요약하여 Table 2에 나타내었다. 침출 실험에 따른 용액의 pH는 8.0에서 12.7로 증가하였다. 이와 같이 pH가 증가하는 것은 콘크리트에 존재하는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  성분이 지하수로 용출되었기 때문인 것으로 판단된다. Table 1에서 나타낸바와 같이 모델링 결과에서도 용액의 pH는 12.5로 나타나 높은 신뢰성을 나타내었다.

Table 2. Comparison of experiment and modeling results.

용액	pH	pe	Temp (°C)	Al (mol/L)	Fe (mol/L)	K (mol/L)	S (mol/L)
지하수	8.0	-2.8	18.70	0.00	0.00	0.06	0.19
반응액 (모델링)	12.5	-9.8	18.70	0.01	0.00	0.06	0.03
침출액 (실험)	12.7	4.3	20	0.04	0.001	0.586	0.065

지하수와 반응 후, 시편 표면, 1cm 깊이, 그리고 중앙부에서 샘플을 채취하여 XRD 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 시멘트 중앙부에서 채취한 샘플에서는 Portlandite, Calcite, Tobermorite, Jennite가 확인되었지만, 표면 및 깊이 1cm에서 채취한 샘플에서는 Portlandite가 관측되지 않았다. 이는 표면 인근에서는 Portlandite가 지하수로 용해되었기 때문으로 판단되며, 지하수 성분분석 결과와 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

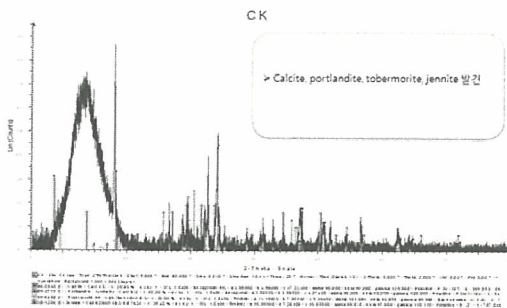


Fig. 2. XRD analysis of concrete samples.

용출반응에 의한 시편에서 화학종의 분포변화를 관찰하기 위하여 EPMA분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 콘크리트와 지하수의 반

응에 의해  $\text{Ca}^{2+}$ 이 용출되어 시멘트 표면 샘플에서 그 농도가 낮아진 것을 확인 할 수 있다.

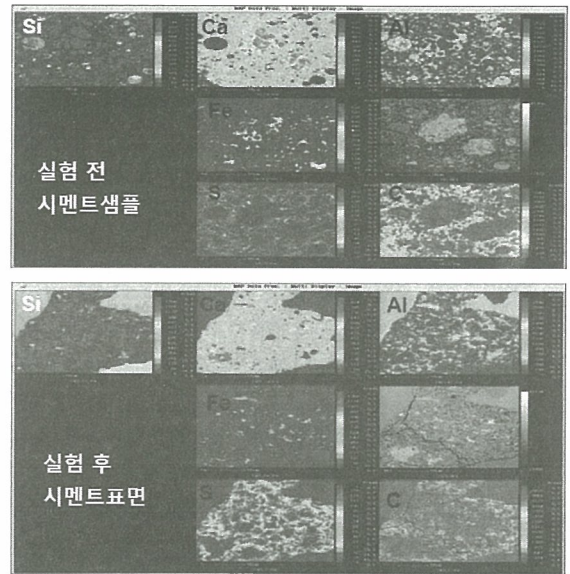


Fig. 3. EPMA analysis of concrete samples.

#### 5. 결론

본 연구 결과를 바탕으로 지하수와 반응하는 콘크리트 표면에서 다음과 같은 반응이 발생하는 것을 알 수 있다.

- 콘크리트 표면에서 Portlandite가 용출현상이 발생한다. 이러한 과정에서 CSH 혹은 Ettringite의 침전현상이 발생한다. 이로 인해 콘크리트와 접촉하고 있는 지하수에서 pH가 12 이상으로 증가하는 현상이 발생한다.

#### 6. 참고문헌

[1] W. Hummel, U. Berner, E. Curti, F.J. Pearson, and T. Thoenen, Nagra/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01, Nagra Technical Report 02-16, 2002.